饲料中添加亚麻籽对延边黄牛肌肉组织及皮下脂肪中脂肪酸组成及其相关基因表达的影响

闫 研 于 伽 王钧艺 严昌国 李香子*

（延边大学农学院，延边黄牛肉牛科学与产业协同创新中心，延吉 133000 ）

摘 要：本试验旨在探讨饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛肌肉组织及皮下脂肪中的脂肪酸组成及与其相关基因表达的影响。试验选取平均体重 480 kg 左右的延边黄牛阉牛 30 只，随机分为 3 组（*n*=10），对照组（CON 组）饲喂基础饲粮，试验组分别饲喂在基础饲粮中添加 8%整粒亚麻籽（WPS 组）和 8%破碎亚麻籽（PS 组）的试验饲粮。试验结束后屠宰，采集背最长肌及皮下脂肪组织，测定其中脂肪酸组成及相关基因表达情况。预试期 10 d，正试期 180 d。结果表明：1）与 CON 组相比，WPS 组和 PS 组的平均日增重和平均日采食量显著提高（$P<0.05$），但饲料利用率无显著差异（$P>0.05$）。2）与 CON 组相比，在肌肉组织中 WPS 组和 PS 组饱和脂肪酸 C16:0 和 C18:0 含量显著下（$P<0.05$），单不饱和脂肪酸 C18:1n-9、C18:2*cis*-9,*trans*-11、C18:2*trans*-10,*cis*-12 含量显著上升（$P<0.05$）；皮下脂肪中 WPS 组和 PS 组单不饱和脂肪酸 C18:ln-9、C18:2n-6、C18:2*cis*-9，*trans*-11、C18:3n-3 的含量显著上升（$P<0.05$），饱和脂肪酸 C10:0、C12:0、C16:0、C18:0 含量显著下降（$P<0.05$）。3）与 CON 组相比，在肌肉组织中 WPS 组和 PS 组的 G 蛋白偶联受体（*GPR*43）、固醇调节元件结合蛋白（*SREBP*）、CCAAT 增强子结合蛋白α（*CEBPα*）和 CCAAT 增强子结合蛋白β（*CEBPβ*）基因的表达量显著下降（$P<0.05$）；在皮下脂肪中 PS 组和 WPS 组的 4 种基因表达量显著上升（$P<0.05$）。由此可见，饲粮中添加亚麻籽可调控延边黄牛肌肉组织及皮下脂肪中脂肪酸组成及相关基因的表达。在本试验条件下，8%破碎亚麻籽（PS 组）添加效果更好，有益于延边黄牛生长性能的提高和脂肪代谢的调控。

关键词：延边黄牛；脂肪酸；基因表达;亚麻籽

收稿日期：2018-03-05

基金项目：国家自然科学基金（31660667）

作者简介：闫 研（1995-），女，吉林长春人，硕士研究生，研究方向为反刍动物营养代谢与高档牛肉生产。E-mail: 1365441565@qq.com

*通信作者：李香子，教授，博士生导师，E-mail: lxz@ybu.edu.cn

中图分类号：S823　　　　　　　　文献标识码：　　　　　　　　文章编号：

近年来，随着生活品质的提高，人们越来越关注畜产品安全与健康。脂肪酸对人类健康的影响一直受到广泛关注，牛肉脂肪组织中一些脂肪酸如油酸和共轭亚油酸（CLA）的异构体[1]对机体健康很有益处，这使得牛肉深受人们喜爱。肉牛脂肪组织中的脂肪酸组成是影响肉品质的重要指标[2]。研究表明，对饲粮中脂肪含量的调整可增加牛肉的营养价值，改变脂肪酸组成，从而更有益于机体的健康[3]。PETRI 等[4]通过饲喂富含亚油酸或亚麻酸的植物油或油料种子增加反刍动物脂肪代谢中产生的油酸和 CLA；林凤英等[5]在饲粮中添加富含不饱和脂肪酸(UFA)，尤其是单不饱和脂肪酸（MUFA）的全脂油籽改变了反刍动物体组织中脂肪酸组成，并通过种皮的特性来影响瘤胃微生物氢化作用。

大量研究表明，脂肪酸参与调节与脂质代谢相关的基因表达和转录[6-7]。其中，固醇调节元件结合蛋白（SREBP）能够促进脂滴的合成，显著促进前体脂肪细胞的分化，并诱导成纤维细胞向脂肪样细胞的转化[8]；CCAAT 增强子结合蛋白（CEBPS）是增强子结合蛋白家族，是脂肪细胞生成及分化过程中起重要调节作用的转录因子[9]；短链脂肪酸受体（GPR43）与脂肪细胞的分化有着密切的相关性，三者都对脂肪的调控有着重要的作用。

目前，关于补饲亚麻籽对肉牛脂肪组织代谢影响的报道较少，因此，本试验通过在延边黄牛的饲粮中添加不同处理（物理破碎法）的亚麻籽，探究其对延边黄牛肌肉组织及皮下脂肪中的脂肪酸组成及与其相关基因表达的影响。

1 材料与方法

1.1 试验动物

选择健康无病，平均体重在 480 kg，体况相近的延边黄牛阉牛 30 头。由延边大学延边黄牛科技示范园提供。

1.2 试验设计

将 30 头延边黄牛阉牛随机分成 3 组，每组 10 头。对照组（CON）饲喂基础饲粮，试验组分别饲喂在基础饲粮中添加 8%整粒亚麻籽（WPS 组）和 8%破碎亚麻籽（PS 组）的试验饲粮。试验过程中除饲粮组成不同以外，其他条件均保持一致，以控制单一变量。预试期 10 d，正试期 180 d。基础饲粮组成及营养水平见表 1。

表 1 基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米 Corn	57.75
玉米青贮 Corn silage	30.0
豆粕 Soybean meal	7.00
麦麸 Wheat bran	2.45
预混料 Premix[1)]	2.80
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels	
综合净能 NE_{mf}/(MJ/kg)[2)]	6.74
粗灰分 ASh	7.22
粗脂肪 EE	3.58
中性洗涤纤维 NDF	26.03
粗蛋白质 CP	12.64
钙 Ca	0.41
总磷 TP	0.36

[1)]预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of the diet:VA 5 000 IU,VD 700 IU,VE 30 IU,Zn 100 mg,Fe 90 mg,Mn 20 mg,Cu 10 mg,I 0.3 mg,Se 0.2 mg。

[2)]综合净能（NE_{mf}）为计算值，计算公式为：NE_{mf}=DE×K_{mf}，K_{mf}=K_m×K_f×1.5/(K_f+0.5×K_m)。式中：NE_{mf}是综合净能；K_{mf}是消化能转化为净能的效率；DE 是饲粮消化能；1.5 为饲粮水平值；K_m 和 K_f 分别是消化能转化为维持净能的效率和消化能转化为增重净能的效率。The combined net energy (NE_{mf}) is the calculated value. The calculation formula is: NE_{mf}=DE×K_{mf}，K_{mf}=K_m×K_f×1.5/(K_f+0.5×K_m). In the formula: NE_{mf} is combined net energy, K_{mf} is the efficiency of the conversion of digestible energy into net energy, DE is the digestibility energy of

the diet, and 1.5 is the dietary level value. K_m and K_f are the efficiency of digestive energy conversion to maintain net energy and net energy for gain, respectively.

1.3 饲养管理

圈舍保持清洁，保证试验动物能够自由饮水，温度适宜，光照充足，相对湿度为55%，并且每天在05:00和17:00饲喂精粗混合饲粮，自由采食。

1.4 样品采集及处理

试验结束在各组试验牛中分别挑选3头牛，体况相近，且体重接近各组的平均值，在空腹24 h以后进行流水线式屠宰。屠宰结束后取背最长肌（第12~13肋骨）肌肉组织和皮下脂肪组织，一部分封袋-20 ℃保存，用于测定脂肪酸；一部分液氮保存，用于测定相关基因的表达。

1.5 测定指标

1.5.1 生长性能的测定

分别在试验期开始和屠宰前进行体重测定，连续2 d在早饲前空腹称重，取平均值计算平均日采食量。每天精准称量并记录每组试验的投料量与剩料量，并测定其干物质的含量，以计算每头牛的平均日采食量，并计算饲料利用率。

饲料利用率（%）＝平均日增重/平均日采食量×100。

1.5.2 肌肉组织及皮下脂肪中脂肪酸含量的测定

提取脂肪：磨碎样品，取1 g于50 mL离心管中，加内标1 mL，再用15 mL萃取液萃取，即氯仿甲醇（氯仿：甲醇=2：1），再用搅拌器充分搅拌，热水冲洗后用氯仿甲醇冲洗，充分提取，振荡1 h，再加入10 mL 0.88%的氯化钠，漩涡振荡并离心，取上清液于酯化管中。

酯化过程：将酯化管中的上清液进行氮吹，在氮吹仪上55 ℃恒温吹干，自然冷却，加4 mL盐酸甲醇，75 ℃水浴锅中催化，再冷却至室温，加入2 mL正己烷，漩涡振荡后静止0.5 h，加4 mL饱和氯化钠，振荡静置待分层，离心，取上清液，使用安捷伦气相色谱仪GC-7890A测定脂肪酸含量。

1.5.3 肌肉组织及皮下脂肪相关基因表达量的测定

总 RNA 提取和 cDNA 合成：使用 Promega Eastep 的总 RNA 提取的试剂盒来提取肌肉和脂肪组织中的总 RNA。再根据 TaKaRa RR047A（Prime Script^{TM} RT reagent Kit with gDNA Eraser）试剂盒说明书，建立 20 μL 的反转录体系，将提取的总 RNA 反转录为 cDNA，4 ℃保存。

实时荧光定量 PCR（RT-PCR）：依据 TaKaRa RR420（SYBR® Premix Ex Taq^{TM}）试剂盒说明书，在 ABI 公司 Veriti® 96-Well Thermal Cycler 的梯度 PCR 仪上测定基因的表达。磷酸甘油醛脱氢酶(*GAPDH*)为管家基因，引物序列见表 2。反应体系 20 μL，10×Buffer 10 μL，上、下游引物各 0.5 μL，ROX 0.5 μL，Reference Dye II 0.5 μL，cDNA 模板 1 μL，dH_2O 7.5 μL。95 ℃预变性 15 s，95 ℃变性 5 s，54~60 ℃退火 30 s，72 ℃延伸 30 s（40 个循环）。相对定量分析采用 $2^{-\triangle\triangle Ct}$ 方法[10]计算。

表 2 RT-PCR 引物序列

Table 2 Primer sequences of RT-PCR

基因 Genes	GeneBank 登录号 GeneBank accession No.	引物序列 Primer sequences （5′—3′）	产物长度 Product size/bp
磷酸甘油醛脱氢酶 *GAPDH*	NM-001034	F：ACTCTGGCAAAGTGGATGTTGTC R:GCATCACCCCACTTGATGTTG	143
G 蛋白偶联受体 *GPR*43	FJ_562212	F:GGCTTTCCCCGTGCAGTA R:ATCAGAGCAGCGATCACTCCAT	86
固醇调节元件结合蛋白 *SREBP*	JN790254	F:ACTACCACGCCAAGTTCCTG R:CGATGCCAATCTCCTCCTT	146
CCAAT 增强子结合蛋白α *CEBPα*	GU947654	F:CCAGAAGAAGGTGGAGCAACTG R:TCGGGCAGCGTCTTGAAC	69
CCAAT 增强子结合蛋白β *CEBPβ*	NM_176788	F:CCAGAAGAAGGTGGAGCAACTG R:TCGGGCAGCGTCTTGAAC1	141

1.6 数据处理

采用 SPSS 19.0 统计软件对试验数据进行单因素方差分析，结果用平均值±标准误表示。$P<0.05$ 为差异显著，$P>0.05$ 为差异不显著。

2 结 果

2.1 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛脂肪酸每日摄取量的影响

由表 3 可知，添加亚麻籽以后，与 CON 组比较，WPS 组和 PS 组的黄牛每日摄入的脂肪酸含量均增加，其中 C6:0、C16:0、C18:0、C18:2n-6、C18:3n-3 和 C18:3n-6 含量显著增加（P<0.05）。

表 3 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛脂肪酸每日摄取量的影响

Table 3 Effects of dietary flax seed on daily intake of fatty acids of *Yanbian* yellow cattle %

项目 Items	组别 Groups		
	CON	WPS	PS
C6:0	3.12±0.02[b]	4.63±0.27[a]	4.64±0.31[a]
C8:0	3.89±0.24	4.24±0.02	4.25±0.04
C10:0	2.34±0.17	2.65±0.01	2.66±0.05
C11:0	0.43±0.22	0.54±0.16	0.55±0.13
C12:0	35.78±0.12	36.50±0.09	36.58±0.06
C14:0	12.50±0.34	14.03±0.15	14.06±0.11
C14:1	0.35±0.12	0.44±0.06	0.44±0.04
C15:0	0.31±0.07	0.41±0.02	0.41±0.03
C15:1	0.49±0.11	0.54±0.07	0.54±0.02
C16:0	88.97±0.64[b]	112.31±0.32[a]	112.54±0.27[a]
C16:1	0.97±0.48	1.20±0.19	1.21±0.24
C18:0	21.44±0.54[b]	34.03±0.39[a]	34.10±0.46[a]
C18:1n-9	54.25±0.37[b]	112.31±0.62[a]	112.54±0.59[a]
C18:2n-6	101.91±0.29[b]	158.58±0.07[a]	158.91±0.11[a]
C18:3n-3	20.83±0.73[b]	225.09±0.26[a]	225.56±0.32[a]
C18:3n-6	0.39±0.57[b]	2.22±0.31[a]	2.22±0.44[a]

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著(P＞0.05)，不同字母表示差异显著(P

＜0.05)。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference ($P＞0.05$), while with different letter superscripts mean significant difference ($P＜0.05$). The same as below.

2.2 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛生长性能的影响

由表 4 可知，与 CON 组相比，WPS 组和 PS 组的平均日增重分别显著提高了 6.25%和 16.67%（$P<0.05$），但 WPS 组和 PS 组的平均日增重差异不显著（$P>0.05$）；WPS 组和 PS 组的平均日采食量分别显著提高了 6.02%和 15.05%（$P<0.05$），但 WPS 组和 PS 组的平均日采食量差异不显著（$P>0.05$）；WPS 组和 PS 组的饲料利用率无显著差异（$P>0.05$）。

表 4 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛生长性能的影响

Table 4 Effects of dietary flax seed on growth performance of *Yanbian* yellow cattle

项目	组别 Groups		
Items	CON	WPS	PS
平均日增重 ADG/kg	0.96±0.02[b]	1.02±0.10[a]	1.12±0.03[a]
平均日采食量 ADFI/kg	11.63±0.39[b]	12.33±0.09[a]	13.38±0.64[a]
饲料利用率 Feed efficiency/%	8.25±0.26	8.26±0.08	8.37±0.46

2.3 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛肌肉组织中脂肪酸组成的影响

由表 5 可知，与 CON 组相比，WPS 组和 PS 组 C16:0 和 C18:0 为主的饱和脂肪酸含量显著下降（$P<0.05$），以 C18:1n-9、C18:2*cis*-9,*trans*-11、C18:2*trans*-10,*cis*-12 为主的单不饱和脂肪酸含量显著上升（$P<0.05$），单不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸显著上升（$P<0.05$）。

表 5 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛肌肉组织中脂肪酸组成的影响

Table 5 Effects of dietary flax seed on fatty acid composition in muscle tissue of *Yanbian* yellow cattle %

项目	组别 Groups		
Items	CON	WPS	PS
C10:0	0.11±0.32[a]	0.06±0.67[b]	0.05±0.05[b]
C12:0	0.21±0.02[a]	0.14±0.39[b]	0.12±0.03[b]
C14:0	2.86±0.22[a]	2.23±0.52[b]	2.14±0.72[b]
C14:1n-5	0.72±0.33	0.61±0.25	0.56±0.37
C16:0	26.74±0.12[a]	22.38±0.32[b]	20.56±0.72[b]
C16:1n-7	3.21±0.55[b]	4.74±0.92[a]	4.56±0.02[a]
C18:0	9.71±0.12[a]	7.23±0.87[b]	7.38±0.06[b]
C18:1*trans*-11	0.79±0.96	0.98±0.02	0.96±0.12
C18:1 n-9	37.76±1.27[b]	42.96±0.13[a]	43.32±0.96[a]
C18:2n-6	6.69±0.03	7.14±0.46	7.38±0.02
C18:2*cis*-9, *trans*-11	1.09±0.04[b]	1.68±0.03[a]	1.61±0.97[a]
C18:2*trans*-10, *cis*-12	1.46±0.27[b]	2.66±0.08[a]	1.99±0.92[b]
C18:3n-3	4.56±0.02	0.93±0.23	1.09±0.08
C20:0	0.02±0.05	0.04±0.02	0.04±0.92
C20:2	1.51±0.54	1.52±0.04	1.70±0.54
C22:0	3.52±0.05	3.99±0.52	4.01±0.22
C20:4n-6	0.01±0.24	0.02±0.04	0.02±0.85
C20:5n-3	0.02±0.54	0.03±0.25	0.03±0.74
C22:1 n-9	0.87±0.71	1.05±0.54	1.07±0.56
C22:6n-3	0.02±0.59	0.02±0.36	0.02±0.35
饱和脂肪酸 SFA	43.16±0.34[a]	34.83±0.59[b]	34.78±0.46[b]

单不饱和脂肪酸 MUFA	43.45±0.37[b]	50.20±0.74[a]	50.47±0.34[a]
单不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸 MUFA/SFA	1.00±0.01[a]	1.44±0.23[b]	1.45±0.14[b]

2.4 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛皮下脂肪中脂肪酸组成的影响

由表 6 可知，与 CON 组相比，WPS 组和 PS 组单不饱和脂肪酸 C18:ln-9、C18:2n-6、C18:2*cis*-9，*trans*-11、C18:3n-3 的含量显著上升（*P*<0.05），饱和脂肪酸 C10:0、C12:0、C16:0、C18:0 含量显著下降（*P*<0.05）。

表 6 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛皮下脂肪中脂肪酸组成的影响

Table 6 Effects of dietary flax seed on fatty acid composition in subcutaneous fat of *Yanbian* yellow cattle %

项目 Items	组别 Groups		
	CON	WPS	PS
C10:0	0.09±0.35[a]	0.03±0.35[b]	0.03±0.37[b]
C12:0	0.19±0.32[a]	0.12±0.36[b]	0.10±0.12[b]
C14:0	2.51±0.63	1.65±0.35	2.2±0.38
C14:1n-5	0.44±0.73	0.45±0.06	0.46±0.28
C16:0	25.24±2.01[a]	21.13±4.68[b]	21.65±3.27[b]
C16:1n-7	3.86±0.22	3.09±0.28	3.78±0.94
C18:0	17.38±1.02[a]	12.57±1.92[b]	12.41±0.98[b]
C18:1*trans*-11	1.11±0.99	1.13±0.10	1.22±0.79
C18:ln-9	37.37±0.64[b]	41.32±0.04[a]	41.42±0.12[a]
C18:2n-6	2.65±0.93[c]	3.49±0.02[b]	4.36±0.44[a]

C18:2*cis*-9，*trans*-11	1.00±0.17[b]	1.86±0.23[a]	1.88±0.58[a]
C18:2*trans*-10，*cis*-12A	0.95±0.56[b]	1.71±0.37[a]	0.80±0.04[b]
C18:3n-3	0.54±0.69[c]	1.23±0.98[a]	0.81±0.01[b]
C20:0	0.04±0.72	0.03±0.89	0.04±0.93
C22:0	0.20±0.76[b]	0.33±0.96[b]	0.78±0.87[a]
C20:4n-6	0.02±0.07	0.02±0.97	0.02±0.04
C20:5n-3	0.04±0.25	0.04±0.01	0.05±0.94
C22:1n-9	0.69±0.94	0.64±0.85	0.74±0.07
C22:6n-3	0.01±0.92	0.02±0.79	0.02±0.02
饱和脂肪酸 SFA	43.66±4.02	39.52±7.26	40.31±5.49
单不饱和脂肪酸 MUFA	43.49±7.64	46.63±6.21	47.62±4.85
单不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸 MUFA/SFA	0.99±0.79	1.18±0.86	1.18±0.88

2.5 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛肌肉组织中相关基因表达的影响。

由表 7 可知，与 CON 组相比，WPS 组和 PS 组的 4 种基因表达量均显著下调（P<0.05），其中 PS 组的 *GPR*43 和 *CEBPα*基因表达量显著下调（P<0.05），WPS 组的 *SREBP* 和 *CEBPβ*基因表达量显著下调（P<0.05）。

表 7 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛肌肉组织中相关基因表达的影响

Table 7 Effects of dietary flax seed on the related genes expression in muscle tissue of *Yanbian* yellow cattle

项目	组别 Groups		
Items	CON	WPS	PS
G 蛋白偶联受体 *GPR*43	1[a]	0.62±0.10[b]	0.16±0.13[c]
固醇调节元件结合蛋白 *SREBP*	1[a]	0.14±0.09[b]	0.15±0.12[b]
CCAAT 增强子结合蛋白α *CEBPα*	1[a]	0.56±0.02[b]	0.17±0.01[c]
CCAAT 增强子结合蛋白β *CEBPβ*	1[a]	0.07±0.01[c]	0.27±0.01[b]

2.6 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛皮下脂肪中相关基因表达的影响

由表 8 可知，与 CON 组相比，PS 组和 WPS 组的 4 种基因的表达量显著上调（P<0.05），其中 WPS 组 *GPR*43 和 *CEBPα*基因表达量显著上调（P<0.05），而 PS 组 *SREBP* 和 *CEBPβ*基因表达量显著上调（P<0.05）。

表 8 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛皮下脂肪中相关基因表达的影响

Table 8 Effects of dietary flax seed on the related genes expression in subcutaneous fat of *Yanbian* yellow cattle

项目	组别 Groups		
Items	CON	WPS	PS
G 蛋白偶联受体 *GPR*43	1[b]	36.89±0.21[a]	4.75±0.87[b]
固醇调节元件结合蛋白 *SREBP*	1[c]	5.36±0.89[b]	27.47±0.72[a]
CCAAT 增强子结合蛋白α *CEBPα*	1[c]	176.69±0.19[a]	94.60±0.77[b]
CCAAT 增强子结合蛋白β *CEBPβ*	1[c]	3.07±0.42[b]	5.62±0.14[a]

3 讨 论

3.1 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛生长性能的影响

本试验中不同处理的亚麻籽均使延边黄牛的平均日增重升高，这与 Raes 等[10]在饲粮中添加不同处理的亚麻籽可提高肉牛的日增重结果一致。Landblom 等[11]在饲粮中添加 12.5%亚麻籽可显著提高肉牛的日增重。李建国等[12]研究也显示，饲粮中添加亚麻籽可增加能量利用率从而提高日增重。

本试验结果表明，在饲粮中添加亚麻籽可提高平均日采食量，这与许蕾蕾等[13]研究结果相一致。在饲粮中添加亚麻籽可增加不饱和脂肪酸的含量，从而提高平均日采食量和平均日增重，对饲料利用率无显著影响。但目前大量研究表明，在饲粮中添加亚麻籽对动物采食量的影响结果不一致。Cooper 等[14]研究结果显示，动物采食量和生长性能与油料作物关系影响不大。所以，今后还将继续研究在饲粮中添加亚麻籽对肉牛采食量的相关性影响。

3.2 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛肌肉组织及皮下脂肪中脂肪酸组成的影响

亚麻籽中有大量的油脂，而油脂内的不饱和脂肪酸含量高达 80%，其中α-亚麻酸占据主体，还有大量的亚油酸[15]。在反刍动物的瘤胃中亚麻酸会通过瘤胃微生物的不完全氢化

作用生成共轭脂肪酸（CLA 和 CLNA），这 2 种不饱和脂肪酸在反刍动物的体内非常重要，有很好的研究前景。而共轭脂肪酸的形成有 2 种途径，内源合成和瘤胃的不饱和氢化作用。

亚麻酸是反刍动物内源合成共轭亚麻酸的前体物，亚麻籽中的α-亚麻酸和亚油酸分别是 n-3 多不饱和脂肪酸和 n-6 多不饱和脂肪酸的合成前体，由于动物不能自身合成，所以亚麻酸是动物机体的必需脂肪酸[16]。罗何峰等[17]研究发现，在饲粮中添加 n-3 不饱和脂肪酸能够调控动物机体脂肪代谢的相关基因的表达，继而影响动物机体的体脂沉积。

本试验探究结果发现，与 CON 组相比，WPS 组和 PS 组延边黄牛肌肉组织中 C16:0 和 C18:0 为主的饱和脂肪酸含量显著下降，以 C18:1n-9、C18:2*cis*-9,*trans*-11、C18:2*trans*-10,*cis*-12 为主的单不饱和脂肪酸含量显著上升。与 CON 组相比，WPS 组和 PS 组延边黄牛皮下脂肪中 C18:ln-9、C18:2n-6、C18:2*cis*-9,*trans*-11、C18:3n-3 等单不饱和脂肪酸的含量显著上调，C16:0，C18:0 等饱和脂肪酸含量显著下调。这与张玉斌等[18]发现奶牛饲粮中添加油籽能够降低乳脂中 C10:0、C12:0、C14:0 以及 C16:0 等含量，增加 C18:1 和 t11C18:1 含量的结果一致。说明饲粮中添加亚麻籽，确实改变了脂肪酸的组成，增加了亚麻酸在瘤胃中的饱和氢化作用，从而提高了不饱和脂肪酸的含量，说明亚麻籽补充剂促进饮食脂质的摄取，同时控制脂肪组织中的脂肪酸生物合成，这与于伽等[19]研究的结果保持一致。

3.3 饲粮中添加亚麻籽对延边黄牛肌肉组织及皮下脂肪中相关基因表达量的影响

*GPR*43、*SREBP*、*CEBPS* 等基因在细胞间的信号传导和转化途径中可以被脂肪酸的组成所影响，它们参与脂肪细胞合成与分化的调控机制，与脂滴的聚积有着密切的关系[20]。其中，*GPR*43 基因广泛存在于机体的脂肪组织、肠胃环境、免疫细胞等不同的组织和细胞之中，它能够被短链脂肪酸激活[21]。在小鼠上的研究发现，*GPR*43 基因主要在小鼠的白色脂肪组织中表达，并且其在脂肪细胞中表达的水平要比其在血管基质细胞中的表达量高[22]。

GPRS 是蛋白偶联受体家族中的一员，在介导细胞间的信号传导中起到重要的调控作用。由于其编码基因的位置在特定染色体上，所以其被称为特异性受体，又叫为游离脂肪酸受体[23]。又因为这种受体在机体很多组织包括脂肪、免疫细胞、肺等组织中表达，因此具有许多的生物学功能，参与了细胞的脂质代谢、免疫细胞的分化等过程。短链脂肪酸

(SCFAs)不仅能为机体供能，还有很重要的生理调控作用，例如调控细胞增殖分化、凋亡、免疫反应和脂类的代谢等[24]。研究表明，GPR43 是 SCFAs 的受体，SCFAs 能与 GPR43 结合发挥很重要的生理功能。GPR43 与脂肪细胞的分化有着密切的相关性。本试验结果显示，与 CON 组相比，WPS 组和 PS 组肌肉组织中 *GPR*43 基因表达量下调，而皮下脂肪中的 *GPR*43 基因表达量上调。脂肪酸组成中单不饱和脂肪酸含量上升，饱和脂肪酸含量下降，同时相关基因 *GPR*43 基因的表达发生了变化，在脂肪细胞中的表达量更高，在肌肉中的表达量则下降，说明添加亚麻籽可以使脂肪酸组成发生变化，调控延边黄牛的脂质代谢。这与王蔚盈[25]研究结果基本一致。

SREBP 是机体重要的核转录因子，与机体脂肪生成基因的调节有很重要的相关性，有大量的研究表明，SREBP 可以直接激活脂肪酸、胆固醇、甘油三酯以及磷脂的生物合成及摄取过程中的 30 多个基因及还原型辅酶II（NADPH）的表达[26]，*SREBP*1 或 *SREBP*2 基因的增加显著促进细胞脂滴的积累[27]。李丽等[28]研究发现 SREBP 第 5 内含子与 C16:1、C18：0、SFA 和甘油三酯及 C16 脂肪酸不饱和指数有显著的相关性。本试验结果显示，在饲粮中添加亚麻籽，与 CON 组相比，试验组的 *SREBP* 基因表达量显著上升，而 C16:1 和 C18：0 等饱和脂肪酸含量又呈显著下降趋势，C18:ln-9、C18:2n-6、C18:2*cis*-9,*trans*-11、C18:3n-3 等单不饱和脂肪酸含量显著上升，说明基因表达量的变化与脂肪酸结构的存在相关性。

CEBPS 是脂肪细胞生成及分化过程中起重要调节作用的转录因子[29]。而 *CEBPA* 基因和 *CEBPB* 基因都是 CEBPS 家族成员，在脂肪等组织的生长、分化及代谢中至关重要[30]。CEBPA 对转录的调控表现在 2 个方面，即转录激活和转录抑制，同时也在细胞的增殖分化、能量代谢、信号传导等方面有重要作用[31]。本试验研究结果显示，与 CON 组相比，在饲粮中添加亚麻籽显著提高 *CEBPA* 和 *CEBPB* 基因的表达，试验组的单不饱和脂肪酸含量也显著上升，说明饲粮添加亚麻籽可以调控脂肪酸的组成及相关基因的表达量。

4 结 论

① 在饲粮中添加亚麻籽，不仅可以增加延边黄牛的平均采食量和平均日增重，而且改变了肌肉及脂肪中脂肪酸的组成，并且调控了 *GPR*43、*SREBP*、*CEBPα*和 *CEBPβ* 基因的表达量。

② 在本试验条件下，破碎处理的亚麻籽（即 PS 组）添加效果更好，有益于延边黄牛生长性能的提高和脂肪代谢的调控。

参考文献:

[1] 梁瑜.西门塔尔杂种牛脂肪酸营养特性及肉品品质研究[D].硕士学位论文.兰州:甘肃农业大学,2012.

[2] Cleef EHCBV, D'Áurea AP,Fávaro VR, et al.Effects of dietary inclusion of high concentrations of crude glycerin on meat quality and fatty acid profile of feedlot fed Nellore bulls[J]. Plos One, 2017, 12(6):e0179830.

[3] BO Z,HONG N,ZHANG W G,et al.Genome wide association study and genomic prediction for fatty acid composition in Chinese Simmental beef cattle using high density SNP array[J].BMC Genomics,2017,18(1):464.

[4] PETRI R M,MAPIYE C,DUGAN M E,et al.Subcutaneous adipose fatty acid profiles and related rumen bacterial populations of steers fed red clover or grass hay diets containing flax or sunflower-seed[J].PLoS One,2014,9(8):e104167.

[5] 林凤英,林志光,邱国亮,等.亚麻籽的功能成分及应用研究进展[J].食品工业,2014,35(2):220–223.

[6] 任阳.饱和与不饱和脂肪酸对猪肌纤维组成的影响及其 AMPK 途径研究[D].博士学位论文.杭州:浙江大学,2014.

[7] CHERIAN G,QUEZADA N.Egg quality,fatty acid composition and immunoglobulin Y content in eggs from laying hens fed full fat camelina or flax seed[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2016,7(3):374–381.

[8] 周颖,郭亮,廖睿,等.亚麻籽对蛋鸭产蛋性能、脂质代谢及肝脏 *SCD*1 基因表达的影响[J].中国粮油学报,2017,32(5):96–101,109.

[9] 陈娜,高青山,严昌国,等.日粮添加亚麻籽对延边黄牛血液共轭脂肪酸及生化指标的影响[C]//第九届中国牛业发展大会论文集.海口:中国畜牧业协会,2014:6.

[10] RAES K,HAAK L,BALCAEN A,et al.Effect of linseed feeding at similar linoleic acid levels on the fatty acid composition of double-muscled Belgian Blue young bulls[J].Meat Science,2004,66(2):307–315.

[11] LANDBLOM D G,OLSON D K,WACHENHEIM C J.Effect of field pea and flaxseed inclusion in receiving calf diets and carryover effect on finishing performance,immune response,carcass quality,and economics[J].Journal of Animalence,2007,85(1):174–175.

[12] 李建国,冯仰廉.反刍动物脂肪代谢的研究进展[J].饲料工业,1998,19(6):5–6.

[13] 许蕾蕾.亚麻籽对育肥牛生长性能及肉品质的影响[D].硕士学位论文.沧州:河北农业大学,2012.

[14] COOPER S L,SINCLAIR L A,WILKINSON R G,et al.Manipulation of the n-3 polyunsaturated fatty acid content of muscle and adipose tissue in lambs[J].Journal of Animal Science,2004,82(5):1461–1470.

[15] VENGLAT P,XIANG D Q,QIU S Q,et al.Gene expression analysis of flax seed development[J].BMC Plant Biology,2011,11:74.

[16] TURNER T D,MAPIYE C,AALHUS J L,et al.Flaxseed fed pork:n-3 fatty acid enrichment and contribution to dietary recommendations[J].Meat Science,2014,96(1):541–547.

[17] 罗何峰,魏宏逵,黄飞若,等.猪生长肥育期持续添加亚麻籽对肌内脂肪含量和脂肪细胞分化相关基因的影响[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第十次学术研讨会论文集.杭州:中国畜牧兽医学会动物营养学分会,2008:1.

[218] 张玉斌,王强,吴建平.日粮添加油葵籽和亚麻籽对奶牛乳脂 CLA 和脂肪酸组成的影响[J].中国奶牛,2013(3):19–23.

[19] 于伽,陈娜,高青山,等.亚麻籽对延边黄牛血液和肌肉中脂肪酸及其相关基因表达的影响[J].中国畜牧杂志,2015,51(S1):87–91.

[20] 赵怀宝,任玉龙.短链脂肪酸在动物体内的生理特点和功能[J].饲料研究,2016(3):29–32.

[21] 孙雨婷,罗军,邱思源,等.奶山羊短链脂肪酸受体基因(*GPR*43)编码区(CDS)的克隆及表达分析[J].农业生物技术学报,2014,22(7):876–882.

[22] 苏浩.兔短链脂肪酸受体 *GPR*41 和 *GPR*43 基因的鉴定[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2013.

[23] NAKAJIMA A,NAKATANI A,HASEGAWA S,et al.The short chain fatty acid receptor GPR43 regulates inflammatory signals in adipose tissue M2-type macrophages[J].PLoS One,2017,12(7):e0179696.

[24] 许会芬,罗军,李芳,等.山羊 *SREBP*-1 基因的超表达对脂肪酸代谢相关基因表达的影响[J].生物工程学报,2012,28(11):1306–1316.

[25] 王蔚盈.地塞米松对哮喘小鼠肺组织中 *GPR*43 受体表达的调节作用[D].硕士学位论文.宿迁:南方医科大学,2013.

[26] ZHANG D W,TOMISATO W,SU L J,et al.Skin-specific regulation of SREBP processing and lipid biosynthesis by glycerol kinase 5[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2017,114(26):E5197–E5206.

[27] CARCANGIU V,MURA M C,DAGA C,et al.Association between *SREBP*-1 gene expression in mammary gland and milk fat yield in Sarda breed sheep[J].Meta Gene,2013,1:43–49.

[28] 李丽,肖永庆,于定荣,等.HPLC 测定五味子中 3 种有机酸的含量[J].中国中药杂志,2011,36(23):3286–3289.

[29] AGATHEESWARAN S,CHAKRABORTY S.MEF2C and CEBPA:possible co-regulators in chronic myeloid leukemia disease progression[J].The International Journal of Biochemistry and Cell Biology,2016,77:165–170.

[30] 贺花,刘小林,顾玉兰.秦川牛 *CEBPA* 基因编码区的 SNP 分析[C]//中国动物遗传育种研究进展——第十五次全国动物遗传育种学术讨论会论文集.杨凌:中国畜牧兽医学会动物遗传育种学分会,2009:1.

[31] EBRAHIMI M,RAJION M A,GOH Y M,et al.Effect of linseed oil dietary supplementation on fatty acid composition and gene expression in adipose tissue of growing goats[J].BioMed Research International,2013,2013:194625.

Effects of Dietary Flax Seed on Fatty Acid Composition and Related Genes Expression in Muscle Tissue and Subcutaneous Fat of *Yanbian* Yellow Cattle

YAN Yan YU Jia WANG Junyi YAN Changguo LI Xiangzi*

(*Co-Innovation Center of Beef Cattle Science and Industry Technology, College of Agriculture, Yanbian University, Yanji* 133000, *China*)

Abstract：This study was conducted to investigate the effects of dietary flax seed on the fatty acid composition and related genes expression in muscle tissue and subcutaneous fat of *Yanbian* yellow cattle. Thirty *Yanbian* yellow cattle with an average weight of about 480 kg were randomly divided into 3 groups (n=10). The cattle in the control group (CON group) were fed a basal diet and those in the experimental groups were fed the basal diets with 8% whole flax seed (WPS group) and 8% broken flax seed (PS group), respectively. Cattles were slaughtered after the test, and the *longissimus dorsi* muscle and subcutaneous fat tissue were collected for detecting the fatty acid composition and related genes expression. The pre-test period was 10 d and the formal test period was 180 d. The results showed as follows: 1) compared with the CON group, average daily gain and average daily feed intake in WPS and PS groups were significantly increased (P<0.05), but there was no significant difference in the feed efficiency (P>0.05). 2) Compared with the CON group, in the muscle tissue, the saturated fatty acid contents of C16:0 and C18:0 in WPS and PS groups were significantly decreased (P<0.05), while the monounsaturated fatty acids contents of C18:1n-9, C18:2*cis*-9, *trans*-11, and C18:2*trans*-10, *cis*-12 were significantly increased (P<0.05); in the subcutaneous fat, the monounsaturated fatty acids contents of C18:ln-9, C18:2n-6, C18:2*cis*-9, *trans*-11, and C18:3n-3 in WPS and PS groups were significantly increased (P<0.05), while the saturated fatty acid contents of C10:0, C12:0, C16:0, and C18:0 were significantly decreased (P<0.05). 3) Compared with the CON group, in the muscle tissue, the gene expression of G protein-coupled receptor (*GPR*43), sterol regulatory element-binding protein (*SREBP*), CCAAT enhancement α (*CEBPα*), and CCAAT enhancement β (*CEBPβ*) in WPS and PS groups were significantly decreased (P<0.05); in the subcutaneous fat, those 4 genes expression were significantly increased (P<0.05). Therefore, dietary flax seed can regulate the fatty acid

composition and related gene expression in the muscle tissue and subcutaneous fat of *Yanbian* yellow cattle. Under this experimental condition, adding 8% broken flax seed has a better effect, and is beneficial to improve growth performance and regulation of fat metabolism of *Yanbian* yellow cattle.

Key words: *Yanbian* yellow cattle; fatty acids; gene expression; flax seed

*Corresponding author, professor, E-mail: lxz@ybu.edu.cn (责任编辑 陈 鑫)